

INTERDISZCIPLINARITÁS

Archeometriai, régészeti
és művészettörténeti tanulmányok



INTERDISZCIPLINARITÁS

Archeometriai, régészeti
és művészettörténeti tanulmányok

Tóth Mária tiszteletére

*„Szeresd a magad kis mesterségét,
amibe beletanultál, és találd benne kedvedet.”*

Marcus Aurelius: Elmélkedések

INTERDISZCIPLINARITÁS

Archeometriai, régészeti
és művészettörténeti tanulmányok

Szerkesztők

Ridovics Anna – Bajnóczi Bernadett –
Dági Marianna – Lővei Pál

Magyar Nemzeti Múzeum – Szépművészeti Múzeum
Budapest 2017

A kötet támogatói:



Magyar Nemzeti Múzeum – Szépművészeti Múzeum – MTA Csillagászati és Földtudományi – Nemzeti Kulturális Alap
Kutatóközpont
Földtani és Geokémiai Intézet

ISBN 978-615-5209-79-6

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó (Lővei Pál)	9
Szubjektív sorok (Ridovics Anna)	10
Tóth Mária archeometriai tárgyú publikációi	13

I. RÉGÉSZET ÉS MŰVÉSZETTÖRTÉNET

T. DOBOSI VIOLA

A hazai paleolitikum kutatása és a természettudományok <i>The Hungarian Palaeolithic research and the natural sciences</i>	29
---	----

BÁNFFY ESZTER

A Vinča-kultúra és a délkelet-európai őskor újabb figurális ábrázolásai a Szépművészeti Múzeumba került lefoglalt tárgyak között <i>New figural depictions of the Vinča culture and other prehistoric cultures of South-East Europe among the confiscated artefacts taken to the Museum of Fine Arts, Budapest</i>	39
---	----

LIPTAY ÉVA

„Aurea ne credas quaecumquae nitescere cernis.” Skeuomorfizmus és anyagszimbolika az ókori egyiptomi művészetben <i>“Aurea ne credas quaecumquae nitescere cernis.” Skeuomorphism and symbolism of materials in the ancient Egyptian art</i>	49
---	----

DÁGI MARIANNA

A Sedes-aranyműves. Egy késő klasszikus – kora hellénisztikus ékszeregyüttes attribúálása <i>The Sedes Goldsmith. Attributing a late Classical – early Hellenistic jewellery group</i>	59
---	----

FAJCSÁK GYÖRGYI

Kína kapui kinyíltak: idegenek és kínaiak a Tang-kor elején. Sírkerámiák a Hopp Ferenc Ázsiai Művészeti Múzeum gyűjteményében <i>The gates of China have opened: foreigners and Chinese people at the beginning of the Tang age. Funerary ceramics in the collection of the Ferenc Hopp Museum of Asiatic Arts</i>	77
---	----

MAROSI ERNŐ

Márvány, homokkő, interdiszciplinaritás <i>Marble, sandstone, interdisciplinarity</i>	87
--	----

HAVASI KRISZTINA

Bevezető a székesfehérvári „királyi bazilika” 11. századi márványfaragványainak anyagvizsgálata elé <i>Introduction to material analysis of the 11th century marble carvings of the Székesfehérvár “royal basilica”</i>	99
---	----

BICZÓ PIROSKA

III. Béla király és Anna királyné vörösmárvány sírlapjairól

On the red marble grave slabs of King Béla III and Queen Anne of Antioch

117

MENTÉNYI KLÁRA

„Columna Lapidea”. A székesfehérvári gránitoszlopokról

“Columna lapidea”. On the Székesfehérvár granite columns

131

LÓVEI PÁL

Színes kövek, festett kőimitációk

Coloured stones, painted stone imitations

155

D. MEZEY ALICE

A Nádasdyak egervári reneszánsz kastélya a 16. században

The Egervár Renaissance castle of the Nádasdy family in the 16th century

171

PATTANTYÚS MANGA

A carrarai márvány. Egy szobrászati nyersanyagról a reneszánsz források tükrében

Carrara marble. On the raw material for statuary in light of the Renaissance written sources

181

RIDOVICS ANNA – MAY ZOLTÁN – BAJNÓCZI BERNADETT

Virágok, sellők, bányászkalapács. Kékmázás hutterita, habán edények és kályhacsempék a bányavárosi műhely munkáinak tükrében

Flowers, mermaids, mining hammer. Blue-glazed Hutterite, Haban vessels and stove tiles in the scoop of the products from the mining town workshop

195

II. ARCHEOMETRIA

MOZGAI VIKTÓRIA

Aranyleletek archeometriai kutatásának lehetőségei

Possible methods for the archaeometric research of gold artefacts

225

T. BIRÓ KATALIN

Röntgendiffrakció a kőeszközök nyersanyag-vizsgálatában

Application of X-ray diffraction in the raw material study of lithic artefacts

243

SZAKMÁNY GYÖRGY – NAGY ANNA

Kerámiák petrográfiai mikroszkópos vizsgálata: megfigyelések és értelmezés

Ceramics under the petrographic microscope: observations and interpretation

249

SIPOS GYÖRGY – BOZSÓ GÁBOR – TÓTH ORSOLYA

A Szépművészeti Múzeum Antik Gyűjteményében őrzött, határon lefoglalt

kerámiaidolok eredetiségvizsgálata TL módszerrel

TL testing of confiscated ceramic idols stored in the Collection of Classical Antiquities, Museum of Fine Arts, Budapest

263

KREITER ATTILA – SKRIBA PÉTER – PÁNCZÉL PÉTER

Árpád-kori kerámiakészítés kontinuitása Szombathely-Zanat Trátai-dűlő és

Szombathely Országúti-dűlő lelőhelyen

Continuity of the Árpadian Age ceramic production at Szombathely-Zanat Trátai-dűlő and

Szombathely Országúti-dűlő archaeological sites

277

BAJNÓCZI BERNADETT – NAGY GÉZA – MAY ZOLTÁN –

BOROS ILDIKÓ – PATTANTYÚS MANGA

Egy reneszánsz mázas terrakotta Madonna szobor (Szépművészeti Múzeum Régi Szobor

Gyűjtemény) anyaghasználata és készítése technikája az archeometriai kutatások tükrében

Material usage and production technology of a Renaissance glazed terracotta Madonna statue

(Collection of Sculpture before 1800, Museum of Fine Arts, Budapest) as evidenced by archaeometric research

299

PINTÉR FARKAS

Budapesti történeti románcement vakolatok ásványtani és mikroszerkezeti jellemzői

Mineralogical and microstructural characteristics of historic Roman cement renders from Budapest

319

III. RESTAURÁLÁS

HUGYECSEK BALÁZS – MAY ZOLTÁN

Víz és Levegő herendi porcelán díszkancsók készítése technikai sokszínűsége

Diverse production technology of the Herend Water and Air porcelain ornamental pitchers

333

A SZÉPMŰVÉSZETI MÚZEUM ANTIK GYŰJTEMÉNYÉBEN ŐRZÖTT, HATÁRON LEFOGLALT KERÁMIAIDOLOK EREDETISÉGVIZSGÁLATA TL MÓDSZERREL

TL TESTING OF CONFISCATED CERAMIC IDOLS STORED IN THE COLLECTION OF CLASSICAL ANTIQUITIES, MUSEUM OF FINE ARTS, HUNGARY

SIPOS GYÖRGY¹ – TÓTH ORSOLYA¹ – BOZSÓ GÁBOR²

¹SZTE Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged, gysipos@geo.u-szeged.hu

²SZTE Ásványtani, Geokémiai és Kőzettani Tanszék, Szeged

Összefoglalás

Viszonylag könnyű másolhatóságuk miatt a régészeti kerámiák, az égetett agyag szobrok és edények esetében gyakran felmerül eredetiségük kérdése. Fokozottan igaz ez a Szépművészeti Múzeum Antik Gyűjteményében található, határon lefoglalt kerámiatárgyak esetében. 2009-ben elvégzett vizsgálataink elsődleges célja az Antik Gyűjteményben őrzött, őskori jellemzőket mutató kerámiaidolok eredetiségének, illetve korának meghatározása volt termolumineszcens (TL) vizsgálatok segítségével. A kormeghatározáson túl röntgen-fluoreszcens spektrometriai (XRF) módszerrel elemösszetételi vizsgálatokat is végeztünk, így mód nyílt az anyagi minőség és a TL tulajdonságok közötti összefüggések feltárására is. Méréseink alapján a vizsgált idollok egyike sem tekinthető eredeti műalkotásnak, a tárgyak szinte mindegyike az utóbbi néhány évtizedben készülhetett. A felvett TL görbék és az XRF eredmények együttes elemzése alapján egyes tárgyak között jelentős hasonlóság figyelhető meg, így esetükben az azonos készítési hely is valószínűsíthető. A vizsgálatok módszertani jelentősége, hogy sikerült igen szoros kapcsolatot kimutatni a TL görbék alakja és a minták anyagi minősége között.

Abstract

Archaeological ceramics, terracotta figures or vases are relatively easy to reproduce, their authenticity, however, is frequently questioned. This question often arises concerning the artefacts confiscated at the borders of Hungary and preserved in the Collection of Classical Antiquities in the Museum of Fine Arts, Budapest. The primary aim of the present research carried out in 2009 was to investigate the authenticity and possible age of some prehistoric-looking terracotta figurines preserved in the Museum using thermoluminescence analysis (TL). Beyond dating, compositional analyses were also performed by using X-ray fluorescence spectrometry (XRF), hence relationships between TL characteristics and the raw material of the objects could also be assessed. Based on the analytical results, none of these idols proved to be an authentic prehistoric piece as they were all produced in the last few decades. Through the simultaneous analysis of TL and XRF data a remarkable material similarity could be observed in the case of certain objects. According to this we can also assume that these very similar pieces may have been produced at the same location. Furthermore, detecting a strong relationship between the shape of TL curves and the material of the samples represents a significant methodological achievement.

Kulcsszavak: termolumineszcencia, röntgen-fluoreszcencia, eredetiség-vizsgálat, határon lefoglalt műtárgyak, Szépművészeti Múzeum, Antik Gyűjtemény

Keywords: thermoluminescence, X-ray fluorescence, authenticity study, confiscated artefacts, Museum of Fine Arts in Budapest, Collection of Classical Antiquities

Előzmények

A Szépművészeti Múzeum kezelésében lévő, a magyar határon lefoglalt külföldi eredetű régészeti tárgyak egy csoportján korábban is történtek archeometriai vizsgálatok. Ezek egyik fő célja annak megállapítása volt, hogy a vizsgált kerámiák, illetve a felületi bevonatuk ásványos (fázis) összetétele alapján a kérdéses tárgyak eredetinek tekinthetők-e vagy nem. A régészeti interpretációval kiegészített természettudományos eredmények számos lefoglalt lelet eredetiségét kétségbe vonták.¹

2009-ben a vizsgálatok szélesebb tárgykörre történő kiterjesztése során felmerült az igény, hogy a megjelenésük alapján őskorinak vélt leletek kora, illetve eredetisége közvetlenül is meghatározható legyen. Az ilyen irányú vizsgálatokban a lumineszcens kormeghatározásnak elengedhetetlenül fontos szerepe van, és széleskörű alkalmazásnak örvend.² A termolumineszcencia (TL) jelensége félvezető ásványok (esetünkben földpátok és kvarc) azon tulajdonságához köthető, hogy az izzáshoz szükségesnél számottevően kisebb hő, vagy adott hullámhosszú fény hatására igen kis, de mérhető mennyiségű fotont bocsátanak ki.³ A TL/OSL fény intenzitása arányos az ásványok által korábban elnyelt, természetes radioaktív sugárzásból (U-238, U-235, Th-232, K-40, Rb-87 bomlása, illetve kozmikus sugárzás) eredő dózis nagyságával. A kormeghatározás elvi alapja, hogy a TL/OSL jel a tárgy kiegészésekor nullázódik, ezt követően azonban újból megindul a felhalmozódása, és ennek mértékéből következtethetünk a korra, amennyiben ismerjük a radioaktív elemek koncentrációjából számítható dózisteljesítmény nagyságát.

Mindezek alapján kutatásunk fő célja a vizsgált kilenc, őskori jellegzetességeket mutató idol készítési korának, illetve eredetiségének meghatározása, ezáltal a régészeti szempontú értékelés elősegítése.⁴ További célunk volt a szokásosnál kevesebb mintát igénylő SAR TL eljárás tesztelése, valamint a felvett TL fénylési görbék, és a kiegészítő XRF (röntgen-fluoreszcens spektrometriai) mérések alapján a vizsgált tárgyak közötti esetleges összefüggések feltárása.

Anyag és módszerek

Mintagyűjtés

A kérdéses idolok (1. táblázat) korának, illetve eredetiségének megállapításához a tárgyakból Proxxon típusú finomfúróval 1,5 mm átmérőjű gyémánt fúrófej segítségével gyűjtöttünk pormintát (1. ábra) kis nyomású nátrium-fényforrás mellett.⁵ A mintázás során a furat külső 2 mm-ét rönt-



1. ábra. Mintagyűjtés Proxxon típusú fúróval (a), az OSZ546 jelű idol mintagyűjtés előtt (b) és után (c)










1 TÓTH 2006.

2 ZIMMERMANN 1971; FLEMING & STONEHAM 1973; ZINK & PORTO 2005; BENEÁ et al. 2007; SIPOS & PAPP 2009.

3 AITKEN 1985, 1998.

4 Ld. Bánffy Eszter tanulmányát a jelen kötetben.

5 SIPOS et al. 2010.

OSZ542	OSZ543	OSZ544	OSZ545	OSZ546	OSZ547	OSZ548	OSZ549	OSZ550
								
95.25.A	448.AB.1	448.AB.4	448.AB.2	448.AB.3	448.AB.5	314.AB	459.AB	456.AB

1. táblázat. Az Antik Gyűjteményben őrzött, TL kormeghatározással vizsgált idolk; felül a laboratóriumi azonosító, alul a múzeumi nyilvántartási szám látható

gen-fluoreszcens (XRF) vizsgálatok céljára különítettük el. A furat további, 3-4 mm-es mélyítésével nyertük ki a TL vizsgálatokhoz szükséges anyagot. Az idoloiból tehát átlagosan 40-50 mg anyag gyűjtésére nyílt mód.

Termolumineszcens vizsgálatok (TL)

A laboratóriumi feltárások során Sipos et al. által ismertetet módon jártunk el⁶: többszöri HCl-os és H₂O₂-os maratását követően a mintáiból acetonos szuszpenziókat készítettünk, amelyeket 1 cm átmérőjű üvegcsövecskékben alumínium korongokra pipettáztunk. Ezeken az acetone elpárolgásával filmszerű bevonat képződött, így az egyes mintáiból számos, átlagosan 2,0-2,2 mg anyagot hordozó korongot készítettünk elő. A feltárási folyamat során a kis mintamennyiség miatt nem nyílt mód a minták szemcseösszetétel szerinti szeparációjára, ami valamelyest növelte a TL mérések bizonytalanságát.

A lumineszcens mérések célja, hogy utólag besugárzott mesterséges dózisok és az általuk gerjesztett lumineszcens intenzitások segítségével meghatározzuk, hogy a mintából kinyert természetes lumineszcens intenzitás (TL) mekkora elnyelt dózishoz (egyenérték dózis) felel meg. A mérések automatizált RISOE DA-15 műszeren történtek, a mesterséges radioaktív besugárzás 0,089 Gy/s dózisteljesítményű (alumínium korongra kalibrált) ⁹⁰Sr/⁹⁰Y béta sugárforrással történt, a minták TL fénylési görbét 5 °C/s-os hevítési ütem mellett 450 °C-ig rögzítettük Corning 7-59 és Schott BG 45 szűrők kombinációján keresztül.

A vizsgálatok megkezdésekor előzetes információk nem álltak rendelkezésre az idolk eredetiségére vonatkozóan, ezért a mérésekhez a polimineralikus, finomszemcsés kerámi minták legrobosztusabb mérés technikáját, az additív dózis módszert alkalmaztuk (multiple aliquot additive dose, továbbiakban MAAD).⁷ Ennek során 3-4 korong-csoportot (2-3 koronggal) különítettünk el az egyes mintákon belül. A korong-csoportokat egyenletesen növekvő mesterséges radioaktív dózissal sugároztuk be. A minták természetes lumineszcens intenzitását 6-9 db korong átlaga alapján határoztuk meg. A természetes lumineszcens intenzitás és a hozzáadott dózisok által előidézett növekvő lumineszcens intenzitások alapján összefüggést állítottunk fel a dózis növekmény és a TL növekmény között. Ez alapján extrapolációval megadtuk, hogy a mért természetes TL mekkora természetes dózis hatására alakulhatott ki. Mivel kialakulásának kezdeti szakaszában (a tárgy kiégetését követően) a lumineszcens jel nem mindig áll lineáris kapcsolatban az abszorbeált dózis nagyságával, ezért erre vonatkozóan további korrekciós méréseket is végeztünk.⁸

6 Sipos et al. 2010.

7 Részletes leírását lásd Sipos & Papp 2009.

8 Sipos & Papp 2009.

Földpáttartalmú mintáknál jelentős hibát eredményezhet a földpátásványok spontán lumineszcens jelvesztése (a kristályrács hibáihoz kötődő elektronok szökése normál hőmérsékleti viszonyok között). Ennek a hibának a részleges kiküszöbölésére szolgál a minták minimum 2 hetes (optimálisan 1 hónapos) tárolása a radioaktív besugárzás és a TL mérések között. Ez idő alatt ugyanis nagyjából stabilizálódik a mintában mesterségesen kialakított lumineszcens jel, az instabil részei leépülnek.

A fentiek miatt az üledékek ilyen szempontból stabil kvarcfrakciójára kifejlesztett OSL (optikailag stimulált lumineszcencia) egymintás regenerációs (single aliquot regeneration, továbbiakban SAR) eljárások⁹ – amelyek során egyazon mintarész (korong) többszöri radioaktív besugárzása (dózis regeneráció) és OSL mérése alapján, a lumineszcens érzékenységváltozás monitorozásával állítható fel a dózis/lumineszcens válasz összefüggés – nem feltétlenül ültethető át a poliminerális TL mérésekbe.¹⁰ Mindazonáltal az ilyen típusú vizsgálatok során a hosszú tárolási idők mellőzésén túl jóval kisebb mintamennyiség is elegendő az abszorbeált természetes dózis meghatározásához. Ezért hozzáadott dózissal végrehajtott MAAD TL méréseink előtt tájékozódó SAR TL méréseket végeztünk a minták egy-egy korongján. Az így kapott eredményeket a vizsgálat végén összevetettük a „klasszikus” mérések eredményeivel.

Az eredetiségvizsgálaton, illetve kormeghatározáson túl a méréseink során kapott TL görbéket a különböző minták között felismerhető esetleges hasonlóságok szempontjából is megvizsgáltuk. Az itt tapasztalt összefüggéseket azután összevetettük a röntgen-fluoreszcens mérések eredményeivel, ahol a kémiai összetételek alapján igyekeztünk csoportokat felállítani. Feltételeztük, hogy a TL görbék intenzitása és lefutása (alakja) utal egyrészt az egyes minták érzékenységére – amelyet befolyásolhat a kiégetési hőmérséklet –, valamint anyagi minőségére.

Az összehasonlító elemzések alátámasztásához referencia TL görbéket is alkalmaztunk. Ezek korábbi, dokumentált ásatásból származó őskori régészeti kerámiákon elvégzett méréseinkből származtak (OSZ388-389, OSZ390, OSZ391, OSZ392). Az öt referencia kerámia egyazon lelőhelyről származott, kettő közülük pedig ugyanabból az objektumból (OSZ388-389 és OSZ390). E két kerámiatárgy közül az egyiknél (OSZ388-389) két pontból is történt mintavétel.¹¹

Röntgen-fluoreszcens vizsgálatok (XRF)

A vizsgált tárgyak készítési idejének megadásához az egyenérték dózis meghatározásán túl, mint már említettük, szükség van a radioaktív elemek koncentrációjának ismeretére is, hiszen a folyamatos bomlásukból adódó dózisteljesítmény adja meg a lumineszcens jel időbeli felhalmozódásának ütemét. A természetes radioaktív elemek közül általában a K-40 hozzájárulása a legjelentősebb a dózisteljesítményhez (átlagos U-Th-K koncentráció mellett 40-50 %), ezért ennek mérése elsődleges fontosságú. A kálium koncentrációját a minimális mintamennyiség miatt roncsolásmentes mikro-XRF mérésekkel határoztuk meg. A módszer a különböző elemek röntgensugárzás által stimulált eltérő hullámhosszú fluoreszcenciáján alapul.¹² A mérésekhez rendelkezésre álló 20-30 mg mennyiségű finom poranyagot két tárgylemez közé téve összepréseltük, majd ezeket szétválasztva méréseinket a homogénebb mintafelszín mutató tárgylemezen végeztük. A meghatározáshoz Rh röntgenforrással felszerelt Horiba Jobin Yvon XGT-5000 típusú műszert használtunk 30 kV-os gerjesztő feszültségen, 0,5 mA anódáram mellett. Minden mintán 3 eltérő helyen, egyenként 1000 s időtartamú mérést végeztünk.

A mérések során a következő fő összetevők oxidban kifejezett százalékos mennyiségét határoztuk meg: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , K_2O , MnO_2 és NaO_2 . Az eredményeket a PAAS (post-Archean Australian average shale – átlagos archaikum utáni ausztrál agyagpala) nemzetköz-

⁹ MURRAY & WINTLE 2000.

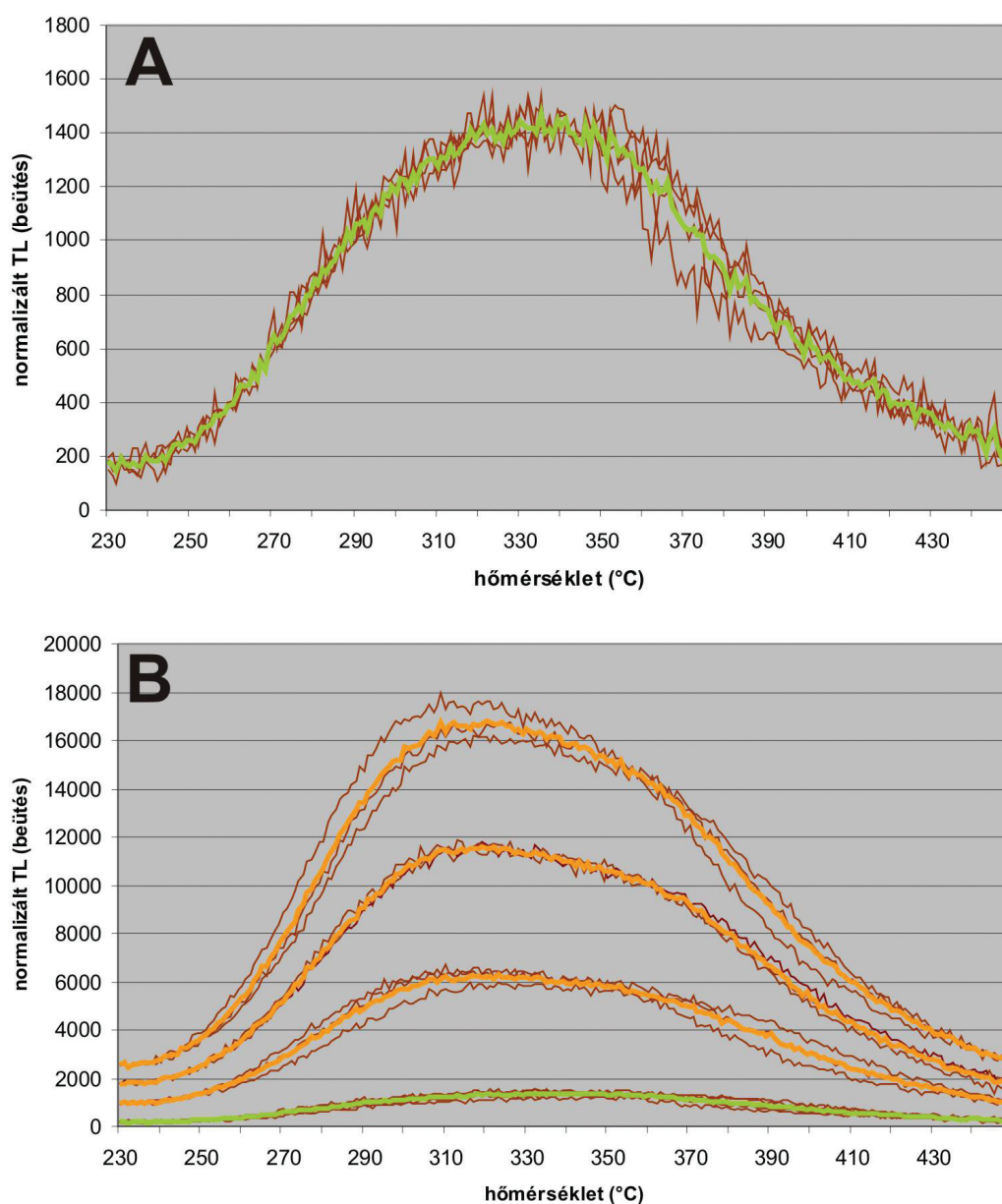
¹⁰ ZINK & PORTO 2005; FEATHERS & RHODES 1998.

¹¹ HORVÁTH et al. 2010.

¹² JENKINS 1999.

zileg elfogadott geokémiai referencia¹³ összetételére normáltuk a könnyebb összehasonlíthatóság végett. A normált adatokat sokleemes gyakorisági diagram és kétváltozós diagramok segítségével értékeltük. Az összehasonlítások során a referenciaként használt őskori kerámiatárgyak eredményeit is bevontuk az elemzésbe.

13 TAYLOR & McLENNAN 1985.



2. ábra. a) Az OSZ544 jelű minta természetes lumineszcens görbéi, és az azokból számított átlaggörbe (zöld vonal); b) ugyanazon minta növekvő hozzáadott dózisokra adott TL válasz görbéi, és azok átlaggörbéi (sárga vonalak)

Minta	Leltári szám	SAR TL De (Gy)	MAAD TL De (Gy)	MAAD-SAR (Gy)
OSZ 542	95.25.A	$0,26 \pm 0,06$	$0,14 \pm 0,01$	-0.14
OSZ 543	448.AB.1	$0,10 \pm 0,05$	$0,10 \pm 0,02$	0
OSZ 544	448.AB.4	$0,08 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,01$	0.03
OSZ 545	448.AB.2	$0,04 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,04$	0.04
OSZ 546	448.AB.3	$0,08 \pm 0,08$	$0,58 \pm 0,04$	0.50
OSZ 547	448.AB.5	$0,13 \pm 0,04$	$0,16 \pm 0,07$	0.03
OSZ 548	314.AB	$0,23 \pm 0,05$	$0,14 \pm 0,02$	-0.09
OSZ 549	459.AB	$0,09 \pm 0,03$	$0,03 \pm 0,02$	-0.06
OSZ 550	456.AB	$0,12 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,01$	-0.01

2. táblázat. A vizsgált minták egyenérték dózis adatai a tájékoztató jellegű SAR TL és a pontosabb MAAD TL mérések alapján

Eredmények

Egyenérték dózis

A tájékoztató SAR TL mérések alapján már valószínűsíthető, hogy a tárgyak mindegyike viszonylag alacsony dózist abszorbeált kiégetése óta (2. táblázat). Ennek ellenére a természetes lumineszcens görbe a legtöbb esetben szép felfutású volt, azaz a minták lumineszcens érzékenysége viszonylag magas (2a. ábra). Mindez nagyban hozzájárult ahhoz, hogy a viszonylag kis dózisok ellenére meglepően pontos eredményeket hoztak mind a MAAD TL, mind a SAR TL típusú mérések (2. táblázat). A hozzáadott dózisok lumineszcenciára gyakorolt hatását az OSZ544 minta TL görbéi jól szemléltetik. A közel hasonló alakú görbék csúcsa a hozzáadott dózisok növelésével csaknem lineárisan növekszik (2b. ábra).

A MAAD TL eljárás során azt, hogy a görbék mely szakaszát vegyük alapul a TL jel/hozzáadott dózis összefüggés meghatározásához, minden egyes mintánál dózis plató teszt segítségével határoztuk meg.¹⁴ Ennek keretében 10°C-onként lépegetve számítottuk ki az összefüggést a TL növekmények és a hozzáadott dózisok között (3a. ábra). Ezután azt a hőmérsékleti tartományt alkalmaztuk a végső összefüggés felállításához, ahol a plató teszt során közel azonos értékeket kaptunk. A függvények alapján minden egyes mintára kiszámítottuk a mintában abszorbeált egyenérték dózis nagyságát (3b. ábra). A számított egyenérték dózisok hibái egyrészt egy szisztematikusan beépített komponensből (1,5%),¹⁵ valamint a regressziós egyenesek pontokhoz való illeszkedéséből adódtak. A megállapított hibák 7–60 % között szóródtak (2. táblázat).

Az MAAD TL és SAR TL mérések közötti eltérés abszolút értelemben ilyen alacsony dózisok mellett a legtöbb esetben elhanyagolható (2. táblázat). Így amikor nincs szükség pontosabb kormeghatározásra, vagyis az alapkérdés megfogalmazható úgy, hogy a vizsgált tárgy vajon 20-21. századi hamisítvány, vagy pedig több száz, esetleg több ezer éves eredeti, a jóval gyorsabb és kevesebb mintát igénylő SAR TL eljárás is sikerrel alkalmazható. Fontos azonban elfogadnunk, hogy amennyiben „idősnek” bizonyul a vizsgált tárgy, az esetlegesen felmerülő eltérő készítési korszakok között ezzel a módszerrel – korábbi vizsgálataink alapján – nem lehet különbséget tenni.¹⁶

¹⁴ AITKEN 1985; FEATHERS & RHODES 1998.

¹⁵ BOETTER JENSEN et al. 2003.

¹⁶ HORVÁTH et al. 2010.

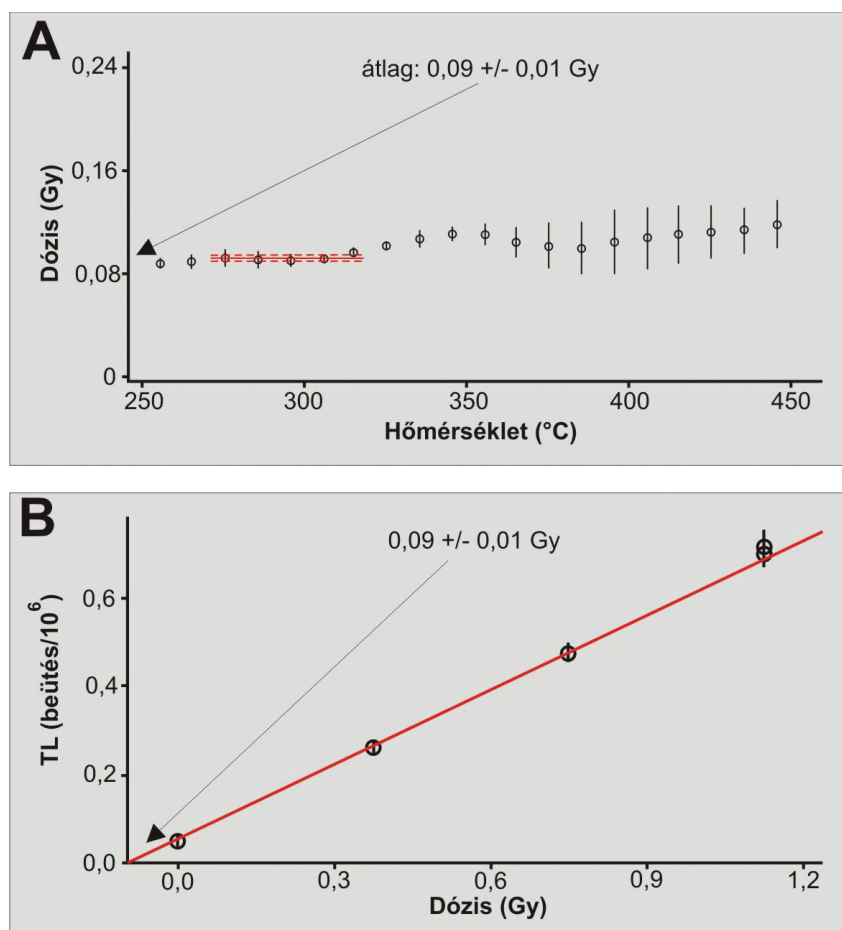
Minta	Leltári szám	^{232}Th (ppm)	U-nat (ppm)	^{40}K (%)	$D^*_{\text{kozsm}}^1$ (Gy/ka)	W^2	$D^*_{\text{tot}}^3$ (Gy/ka)
OSZ 542	95.25.A	10,0±3,3	3,0±1,0	1,38±0,07	0,18±0,02	0,03±0,01	4,21±0,77
OSZ 543	448.AB.1	10,0±3,3	3,0±1,0	1,34±0,07	0,18±0,02	0,03±0,01	4,17±0,77
OSZ 544	448.AB.4	10,0±3,3	3,0±1,0	1,48±0,07	0,18±0,02	0,03±0,01	4,31±0,79
OSZ 545	448.AB.2	10,0±3,3	3,0±1,0	1,88±0,08	0,18±0,02	0,03±0,01	4,72±0,85
OSZ 546	448.AB.3	10,0±3,3	3,0±1,0	1,80±0,08	0,18±0,02	0,03±0,01	4,63±0,84
OSZ 547	448.AB.5	10,0±3,3	3,0±1,0	1,34±0,07	0,18±0,02	0,03±0,01	4,17±0,76
OSZ 548	314.AB	10,0±3,3	3,0±1,0	1,67±0,07	0,18±0,02	0,03±0,01	4,50±0,82
OSZ 549	459.AB	10,0±3,3	3,0±1,0	1,74±0,07	0,18±0,02	0,03±0,01	4,57±0,83
OSZ 550	456.AB	10,0±3,3	3,0±1,0	1,28±0,07	0,18±0,02	0,03±0,01	4,11±0,75

¹ kozmikus sugárzásból származó dózisteljesítmény

² nedvesség tartalom

³ összes dózisteljesítmény

3. táblázat. A vizsgált minták dózisteljesítménye, és az azt meghatározó paraméterek



3. ábra. a) Az OSZ544 jelű minta dózis plató tesztje; megfigyelhető, hogy a minta 270-320 °C között viselkedik a legstabilabban, ezért az additív dózis lumineszcens válasz összefüggést (b) ebben a hőmérsékleti tartományban számítottuk ki

Dózisteljesítmény

A minták összes K tartalmát XRF mérésekkel határoztuk meg (3. táblázat). Az összes K tartalom-ból a radioaktív ^{40}K izotóp mennyisége, és a vonatkozó fajlagos aktivitás számítható. A minták Th és U tartalmát a fenti módszerrel nem tudtuk meghatározni, erre a későbbiekben a nagyon kis mintamennyiség miatt csak ICP-MS mérésekkel nyílhat lehetőség. Emiatt a fenti elemekre átlagos értékeket vettünk alapul, amelyeket jelentős hibával terheltünk (U^{nat} : $3,0 \pm 1,0$ ppm, ^{232}Th : $10,0 \pm 3,3$ ppm). A vizsgálat által megkívánt pontosság mellett az átlagértékek alkalmazhatóságát alátámasztja az a tény is, hogy az összdózisteljesítmény jelentős részét, jelen esetben mintegy 40 %-át a ^{40}K adja.

Az U, illetve a Th bomlása során jelentkező alfa sugárzás hatékonyságát irodalmi adatok alapján¹⁷ $10 \pm 2\%$ -osnak vettük. A radioaktív egyensúly esetleges hiányát, amely a gáznemű ^{222}Rn uránbomlási sorból történő távozásából adódhat, a kis mintamennyiség miatt nem lehetett számszerűsíteni. Ezért Bailiff mérései alapján $15 \pm 15\%$ -os ^{222}Rn veszteséggel számoltunk.¹⁸

A kerámiák nedvességtartalmát (W), amely jelentős abszorpciójával csökkentheti a földpát és kvarc ásványokban elnyelt dózist,¹⁹ alacsonyra, 2-3 tömeg % közöttire becsültük.²⁰ Ezt követően a különböző sugárzástípusok dózisteljesítményét Zimmermann alapján korrigáltuk.²¹ A nedvességtartalomban rejlő bizonytalanságok jelentős hibával járultak hozzá a számításokhoz (3. táblázat). A környezeti háttérsugárzás egy részét szolgáltató kozmikus sugárzást Prescott és Hutton alapján számítottuk közép-európai földrajzi szélességekre.²²

A fentiek alapján meghatározott dózisteljesítmény értékek $17\text{--}18\%$ körüli hibával $4,11$ és $4,72$ Gy/ka között ingadoztak (3. táblázat).

A kapott koradatok

A TL korokat az egyenérték dózis [Gy] és a dózisteljesítmény [Gy/ka] értékek hányadosa adja. A számítások során a MAAD TL mérésekkel megállapított egyenérték dóziseket alkalmaztuk. A kapott

Minta	Leltári szám	MAAD TL De (Gy)	D^*_{tot} ² (Gy/ka)	Kor ¹ (ka)	Készítési dátum
OSZ 542	95.25.A	$0,14 \pm 0,01$	$4,21 \pm 0,77$	$0,03 \pm 0,01$	AD 1970-1990
OSZ 543	448.AB.1	$0,10 \pm 0,02$	$4,17 \pm 0,77$	$0,02 \pm 0,01$	AD 1980-2000
OSZ 544	448.AB.4	$0,11 \pm 0,01$	$4,31 \pm 0,79$	$0,03 \pm 0,01$	AD 1970-1990
OSZ 545	448.AB.2	$0,08 \pm 0,04$	$4,72 \pm 0,85$	$0,01 \pm 0,01$	AD 1990-2010
OSZ 546	448.AB.3	$0,58 \pm 0,04$	$4,63 \pm 0,84$	$0,12 \pm 0,02$	AD 1870-1910
OSZ 547	448.AB.5	$0,16 \pm 0,07$	$4,17 \pm 0,76$	$0,04 \pm 0,02$	AD 1950-1990
OSZ 548	314.AB	$0,14 \pm 0,02$	$4,50 \pm 0,82$	$0,03 \pm 0,01$	AD 1970-1990
OSZ 549	459.AB	$0,03 \pm 0,02$	$4,57 \pm 0,83$	$0,01 \pm 0,01$	AD 1990-2010
OSZ 550	456.AB	$0,11 \pm 0,01$	$4,11 \pm 0,75$	$0,03 \pm 0,01$	AD 1970-1990

¹ az egyenérték dózis és a dózisteljesítmény hányadosa (ka: ezer év)

² összes dózisteljesítmény

4. táblázat. A vizsgált minták kiegészítése óta eltelt idő, illetve a készítés dátuma

17 AITKEN 1985.

18 BAILIFF 2007.

19 AITKEN 1985.

20 BAILIFF 2007.

21 ZIMMERMANN 1971.

22 PRESCOTT & HUTTON 1977.

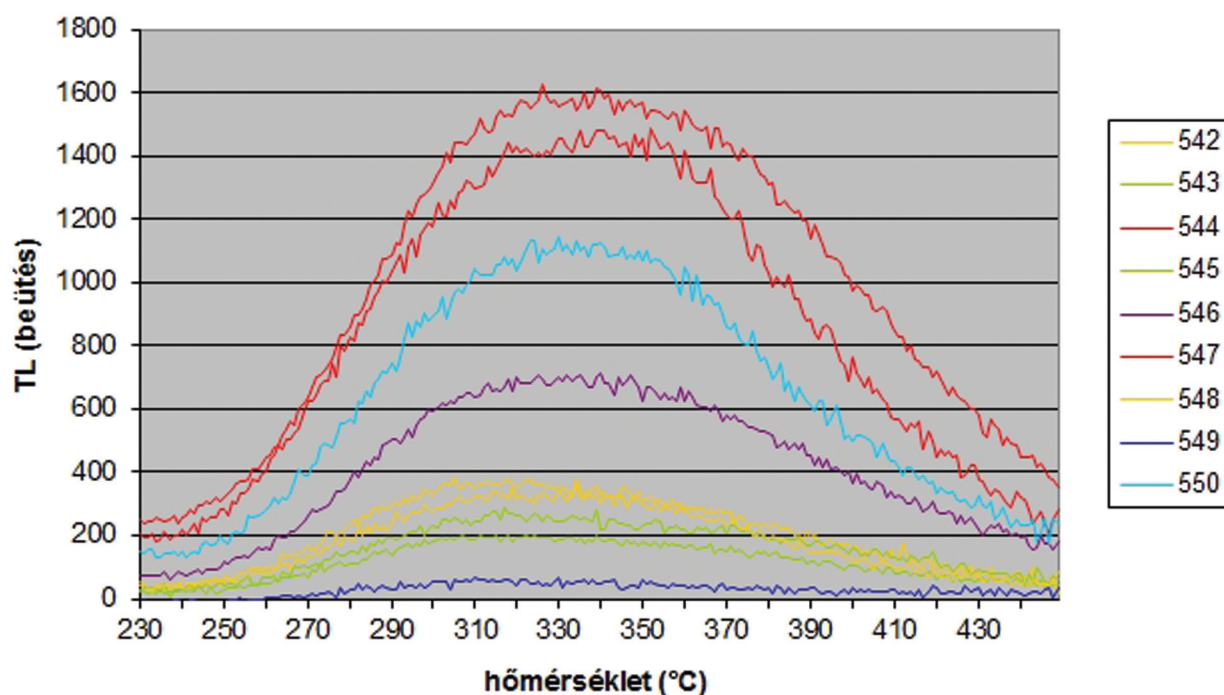
korok általában 20 % körüli hibával terheltek, ami megfelel az ilyen típusú, elsősorban eredetiségre vonatkozó mérések pontosságának. Annál is inkább, mivel jelen esetben a módszer szokványos mérési határán kívül eső korokat kaptunk.

Méréseink alapján a vizsgált idolkok közül egyik sem tekinthető eredetinek. A kapott korok alapján ugyanis a tárgyak többsége az utóbbi 2-3 évtizedben készülhetett (4. táblázat). Egy tárgynál (OSZ549) kaptunk nagyon alacsony kort, amit a minta lumineszcens érzékenységet figyelembe véve szintén elfogadhatónak ítélnék. Egy másik tárgynál (OSZ546) a többitől eltérően valamivel magasabb kort határoztunk meg, ami 19. század végi – 20. század eleji készítési időre utal. Felmerül a kérdés, hogy régészeti szempontból reális-e a kapott eredmény. Amennyiben igen, akkor kijelenthetjük, hogy a mindössze néhány évtizede készült hamisítványok mellett 100-120 éves másolatok/darabok is előfordulhatnak a határon lefoglalt régészeti tárgyak között.

A minták hasonlóságának vizsgálata TL görbéik alapján

A kerámiák előéletéből fakadóan felmerülhet a kérdés, hogy a vizsgált hamisítványok között vannak-e olyanok, amelyek hasonló anyagból készültek, ezáltal feltételezhető-e, hogy azonos a készítési helyük.

E kérdések megválaszolására először a természetes TL, valamint a regenerált TL görbéket hasonlítottuk össze. Első lépésként az egyes mintákhoz tartozó 6-9 db természetes TL görbét átlagoltuk,



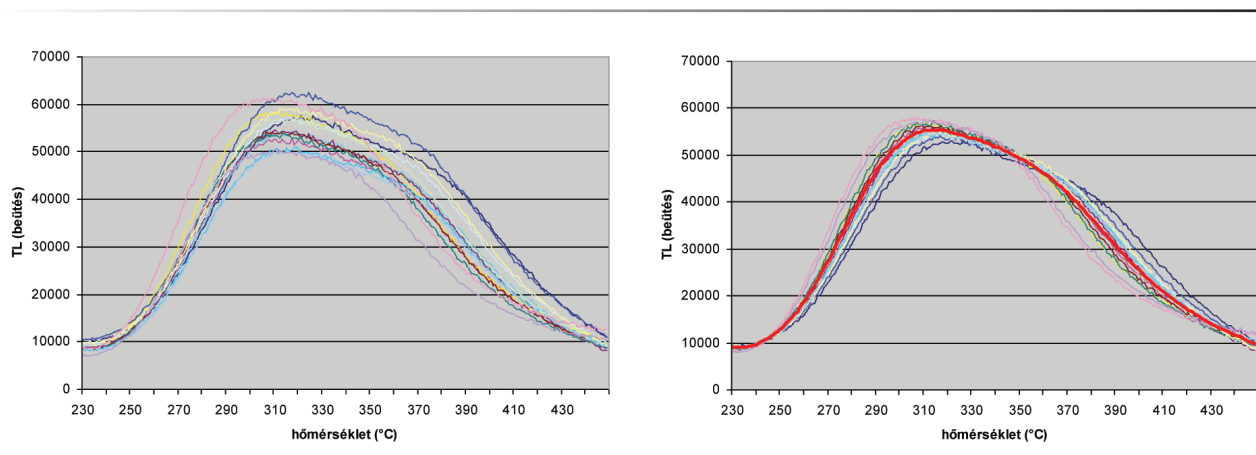
4. ábra. A vizsgált minták átlagos természetes TL görbéi; az azonos színnel jelölt minták maximális TL intenzitása és görbéik lefutása nagy hasonlóságot mutat

majd az átlag TL görbéket egymásra fedettük (4. ábra). Az átlagos intenzitás görbék alapján három pár mintáról lehet feltételezni, hogy amennyiben hasonló lumineszcens érzékenységgel rendelkeznek (egységnyi radioaktív besugárzásra azonos mennyiségű TL jel alakul ki bennük), akkor készítésük óta szinte azonos mennyiségű TL jel halmozódott fel bennük, hiszen intenzitás görbéik maximuma és lefutása igen hasonló (4. ábra). Ezek a mintapárok a következők: OSZ542-OSZ548, OSZ544-OSZ547, OSZ543-OSZ545.

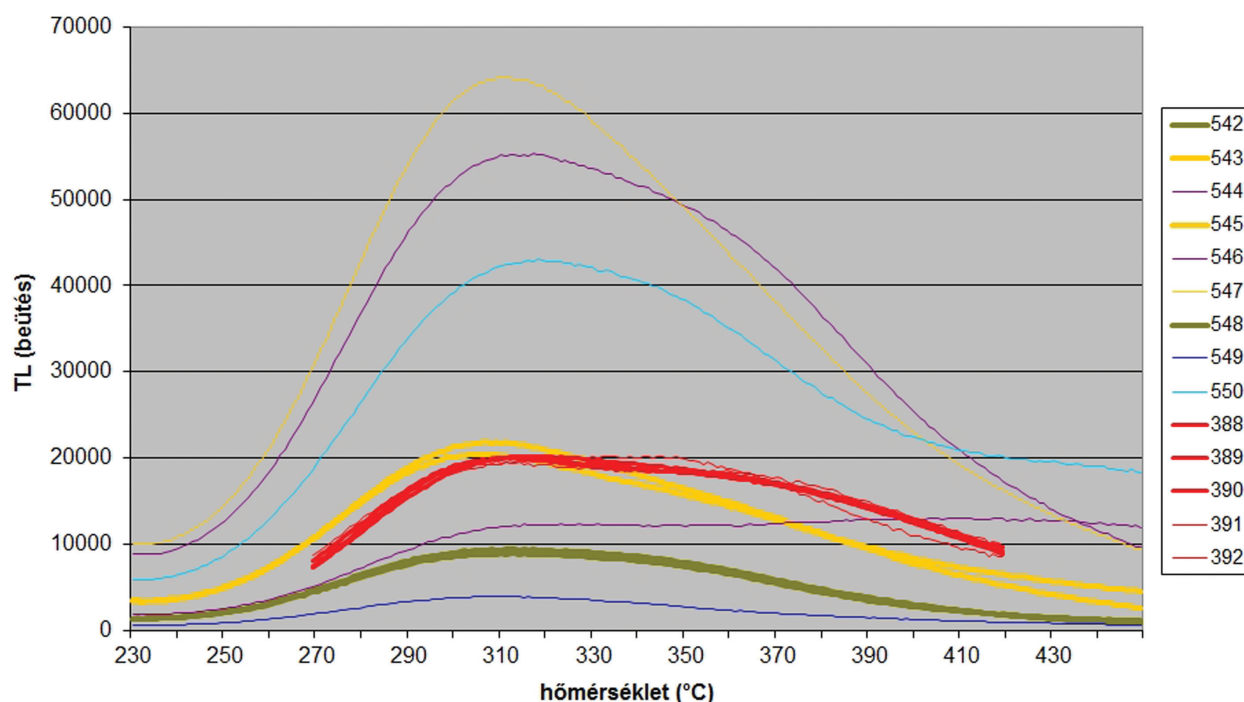
Mivel az ülepítési eljárás során a mintahordozó korongokra csak nagyjából lehet azonos mennyiségű anyagot ülepíteni, ezért a MAAD TL méréseket követően minden egyes korong normalizáción

esik át. A normalizáció során minden korong azonos nagyságú radioaktív dózist kap (jelen esetben hozzávetőleg 4 Gy). Az erre adott lumineszcens válaszok eltérő nagysága alapján lehet azután a különböző anyagmennyiségből adódó eltéréseket korrigálni. Mivel méréseink során minden minta minden korongjánál ugyanazt a dózist alkalmaztuk, ezért a vizsgált tárgyak lumineszcens érzékenységéből adódó eltérések (nagyobb érzékenység – intenzívebb TL) is kimutathatók, emellett a görbék alakja utalhat a hasonló anyagminőségre.

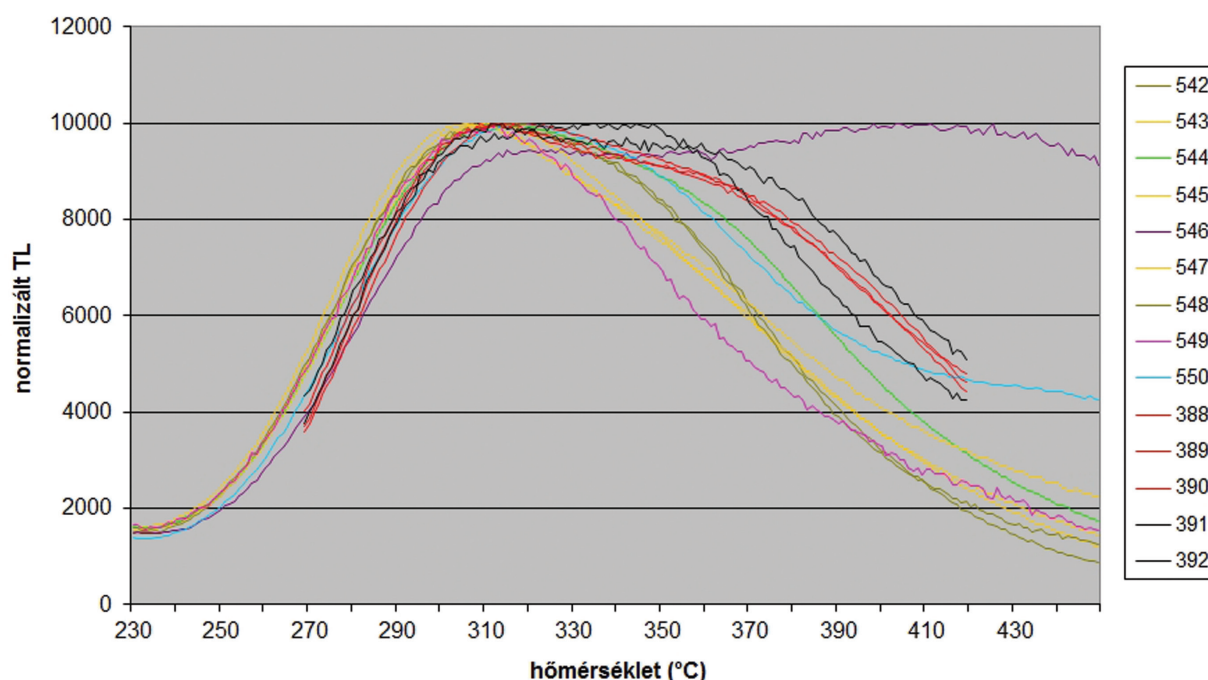
Az adott minta egyes részmintáira vonatkozó normalizációs TL görbék a változó mintamennyiség miatt természetesen némileg eltérnek (5a. ábra). Ezért a görbéket a görbék alatti területek átlagával normalizáltuk, így az adott mintára vonatkozó átlagintenzitás jelentősen nem változott,



5. ábra. a) Az OSZ544 jelű minta 15 db részmintájának ~4 Gy besugárzásra adott TL válaszgörbéi; b) A normalizált TL görbék és az azokból számított átlaggörbe (vastag piros vonal)



6. ábra. A vizsgált minták ~4 Gy besugárzásra adott átlagos TL görbéi; a hasonló lefutású görbéket azonos színnel jelöltük és vastagítással emeltük ki



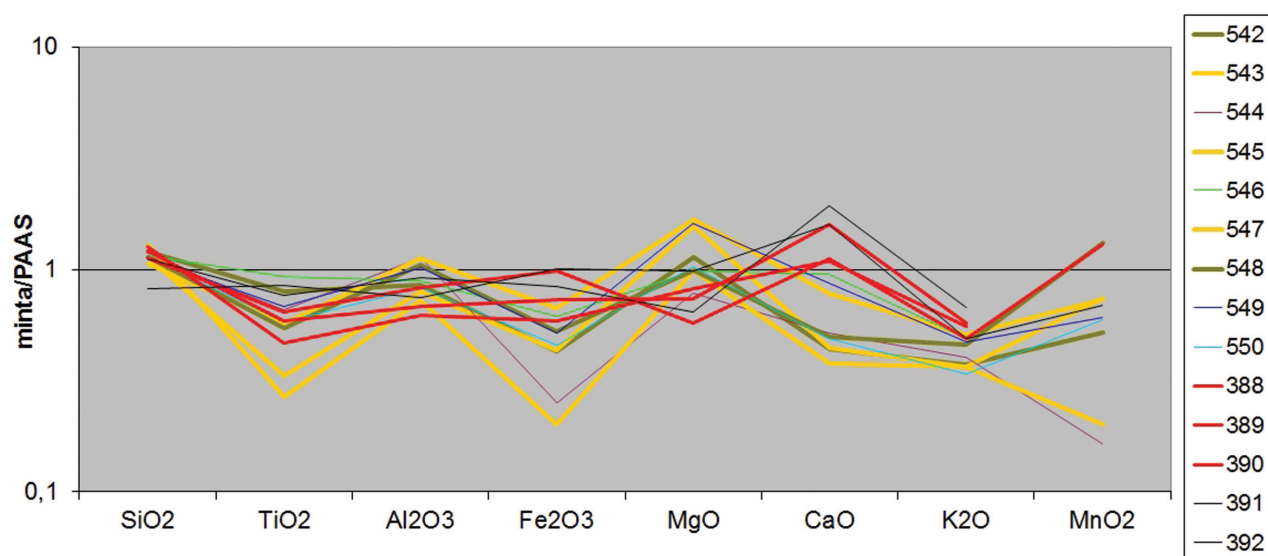
7. ábra. Egymásba csúsztatott TL átlaggörbék, az alak hasonlóságot azonos színnel jeöltük

de a görbék jobb fedésbe kerültek (5b. ábra). Ezt követően összehasonlítottuk az egyes tárgyak átlaggörbéit (6. ábra). Feltűnő, hogy a referencia minták (OSZ388-OSZ392) görbéi mennyire hasonló érzékenységet és lefutást mutatnak. Ilyen mérvű egyezőséget az Antik Gyűjtemény mintáin belül az OSZ542-OSZ548, illetve az OSZ543-OSZ545 mintapárok kapcsán tapasztaltunk. Így e mintáknál nemcsak a természetes TL, de az azonos besugárzásra adott regenerált TL válasz is szinte azonos, ami tovább erősíti a feltételezést, hogy a tárgyak anyaga hasonló.

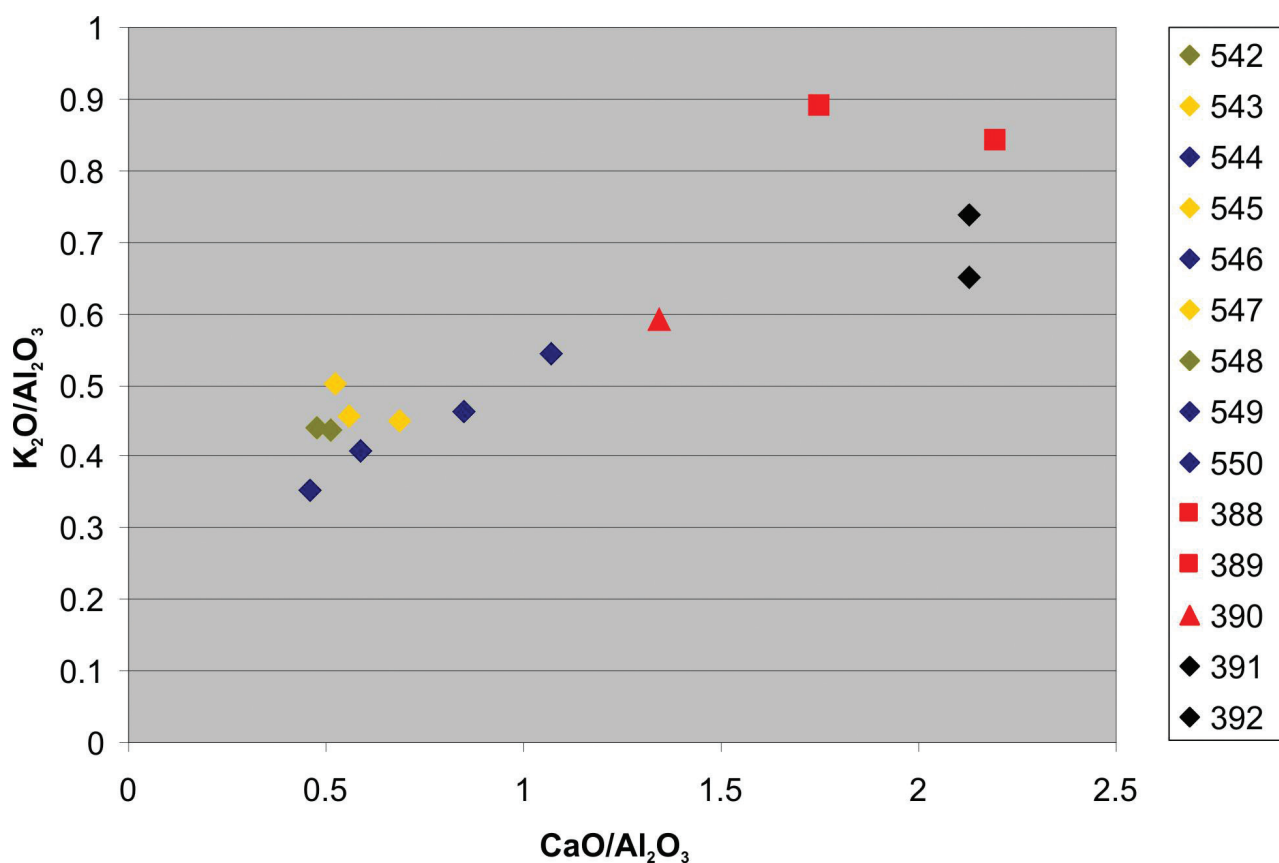
Mivel az 6. ábrán az érzékenységben megfigyelhető jelentős szórás miatt a nagyobb, illetve kisebb érzékenységű görbék alakja nehezen összehasonlítható, ezért következő lépésként a görbéket maximumaik alapján azonos viszonyítási TL szinthez transzformáltuk (7. ábra). Jól látható, hogy a referencia minták (OSZ388-OSZ392) közül is elsősorban az azonos objektumból származók fedik egymást, azaz a lumineszcens mérések alapján ezeknél feltételezhető a legszorosabb kapcsolat. Az Antik Gyűjteményben őrzött darabok között alak szempontból továbbra is szembetűnő az egyezés az OSZ542 és OSZ548 minták között. A transzformációt követően az OSZ543-OSZ545 mintapár valamelyest eltávolodott egymástól, ellenben az OSZ547 TL görbe szinte teljes fedésbe került az OSZ543 TL görbével. Így bár az OSZ 547 minta jóval érzékenyebb, anyagi hasonlósága a TL mérések alapján valószínűsíthető (7. ábra).

A minták hasonlóságának vizsgálata kémiai összetételük alapján

A lumineszcens tulajdonságok mellett a kémiai összetétel alapján is összevetettük a mintákat. A fő komponenseket a PAAS értékeivel osztottuk, így a balatonőszödi referencia mintákra és az Antik Gyűjtemény mintáira vonatkozó adatok könnyebben összehasonlíthatóvá váltak. A normalizált értékek alapján képzett sokelemes gyakorisági diagramon (spider diagram) jól látható, hogy a referencia minták görbéjének futása hasonló tendenciát követ, jelentősebb eltérés a MgO tartalomban figyelhető meg (8. ábra). A referencia minták SiO₂ és a CaO tartalma nagyobb a PAAS SiO₂ és CaO koncentrációjánál, ennek megfelelően a többi komponens részaránya kisebb. Az Antik Gyűjteménybeli csoportnál szintén hasonló lefutás figyelhető meg, a PAAS-hez képest általában kiugró MgO és kifejezetten kis CaO értékekkel (8. ábra). A lumineszcens tulajdonságok alapján alkotott csoportok



8. ábra. Az Antik Gyűjtemény mintái és a referencia minták sokелеmes gyakorisági diagramja (spider diagram); a TL görbék alapján hasonló mintákat azonos színnel jelöltük



9. ábra. Az Antik Gyűjteménybeli minták és a referencia minták kétváltozós korrelációs diagramja (a PAAS összetételére normált koncentrációértékeket használva); a TL görbék alapján hasonló mintákat azonos jellel és színnel jelöltük

közül az OSZ542-OSZ548 mintapár továbbra is igen hasonlóan viselkedik. Ha a függőleges irányú eltolódást nem számítjuk, a TL görbék alapján kevésbé összetartó OSZ543-OSZ545-OSZ547 mintahármas görbéinek lefutása szintén nagyon hasonló. Az OSZ549 minta is jól igazodik ez utóbbi csoporthoz (8. ábra).

A kerámiában a radioaktív sugárzás hatására elsősorban a kvarc és földpát ásványokban alakul ki a kormeghatározás alapját képező lumineszcens jel, amit azután hevítés segítségével (TL) nyerhetünk ki. Ezért a TL görbék és a kémiai összetétel közötti kapcsolatot érdemes olyan komponenseknél alaposabban is megvizsgálni, amelyek a fenti ásványok felépítésében döntő szerepet játszanak. Mivel a TL jel legnagyobb részét a lumineszcens szempontból igen érzékeny földpátok adják, ezért kézenfekvő az ezekben megtalálható Al_2O_3 , K_2O és CaO alkotók vizsgálata. A CaO kapcsán fel kell hívni arra a figyelmet, hogy az XRF méréseket feltáratlan, míg a TL méréseket HCl -al kezelt mintákon végeztük, azaz a kerámiák esetleges karbonát-, vagy mésztartalma jelentősen befolyásolhatja a kapott értékeket. Ki kell azonban emelni, hogy a Kalypso mintáknál a feltárások során nem tapasztaltunk reakciót a HCl kezelés során, valamint az igen alacsony CaO tartalom (8. ábra) is arra utal, hogy a Ca elsősorban a földpátokban van jelen. A referencia minták kezelése során reakciót is tapasztaltunk és a CaO tartalom is magasabb volt, így itt számolni kell az ebből adódó különbségekkel.

A PAAS összetételére normált mérési eredményeket $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ kétváltozós korrelációs diagramon is ábrázoltuk, ahol a TL görbék alapján kialakított csoportokat eltérő színekkel jelöltük (9. ábra). A referencia minták $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ adatainak jelentős szórása figyelhető meg a fent említett okokra visszavezethetően. Ezzel szemben az Antik Gyűjtemény mintáinál, amelyek HCl -el nem reagáltak, ismét viszonylag jól elkülönülnek a TL vizsgálatok során megfigyelt csoportok. Az OSZ542-OSZ548 mintapár tagjai szinte fedik egymást, és az OSZ543-OSZ545-OSZ547 mintahármas tagjai is viszonylag szoros kapcsolatban állnak. A többi tárgyra meghatározott értékek jobban szóródnak, de így is kevésbé, mint a referencia mintacsoport (OSZ388-OSZ392) tagjai (9. ábra).

Következtetések

A termolumineszcens kormeghatározás alapján az Antik Gyűjteményben őrzött, a jelen kutatás keretei között megvizsgált, határon lefoglalt tárgyak egyike sem tekinthető őskori alkotásnak, azaz modern eredetük egyértelműen bizonyítható. A tárgyak többsége az utóbbi évtizedekben készült. A bizonytalan környezeti paraméterek miatt a kapott korok átlagosan 30 %-os hibával rendelkeznek. Az eredmények további pontosítására a tárgyak egymással való kapcsolatának régészeti szempontú vizsgálata során kerülhet sor.

Termolumineszcens méréseink alapján megállapítható, hogy az eredetiség kérdésének eldöntése nemcsak a klasszikus MAAD TL protokollt követve, de a sokkal kevesebb mintát igénylő és gyorsabb kivitelezést lehetővé tevő SAR TL eljárással is lehetséges. Ezzel azonban abszolút kor meghatározása nem lehetséges. A két mérési protokoll eredményei közti különbség jelen alkalmazás keretein belül átlagosan mindössze 0,1 Gy volt. A vizsgált minták termolumineszcens szempontból érzékenynek tekinthetők, azaz a kiégetésük óta bennük elnyelt dózis viszonylag intenzív természetes TL jelet produkált. Az azonos dózissal regenerált TL görbék összehasonlítása alapján kitűnt, hogy az OSZ542 és az OSZ548 minták szinte teljesen egyformán viselkednek, lumineszcens érzékenyséjük azonos, és a belőlük nyert TL görbék fedik egymást. A kémiai összetétel vizsgálatok (mikro-XRF) során is egyértelmű összetartozás figyelhető meg, ami a földpátokat felépítő elemek alapján még nyilvánvalóbb. Mindez rámutat arra, hogy a két tárgy feltehetően azonos anyagból készült, ráadásul hasonló égetési technológiával. Az égetési hőmérséklet meghatározásához röntgen-diffrakciós mérések szükségesek.

Az OSZ543-OSZ545 mintapárnál a természetes TL görbe, az OSZ543-OSZ547 mintapárnál pedig a regenerált TL görbe mutatott szinte teljes átfedést. A regenerált görbék közül az OSZ545, de még az OSZ549 minta görbéi is nagyon közel húzódtak az OSZ543-OSZ547 csoporthoz. Az egyértelműnek tűnő, de lazább kapcsolatot az XRF eredmények is alátámasztották. Mindezek alapján az

OSZ543-OSZ545-SZ547 mintahármasnál is valószínűsíthető a hasonló eredet, és ha nem is szorosan, de az OSZ549 minta is ehhez a csoporthoz sorolható. A fennmaradó minták (OSZ544, OSZ546, OSZ550) TL görbéik és kémiai összetételük alapján is elkülönülnek a fenti csoportoktól.

Az Antik Gyűjteményben őrzött, határon lefoglalt tárgyakon végzett vizsgálataink alapján tehát a kormeghatározás során felvett TL görbék alakja és a minták anyaga között összefüggés figyelhető meg. Az összefüggések pontos feltárása ugyan további kutatásokat igényel, de előrevetíti, hogy a későbbiekben a TL görbéket alkalmazni lehet az anyagi minőségben megfigyelhető hasonlóságok, esetleges egyezőségek felismerésére.

BIBLIOGRÁFIA

- AITKEN, M. J. (1985): Thermoluminescence dating. Academic Press, London.
- AITKEN, M. J. (1998): An introduction to optical dating. Oxford University Press, London.
- BAILIFF, I. K. (2007): Methodological developments in the luminescence dating of brick from English Late-Medieval and Post-Medieval buildings. *Archaeometry* 49/4: 827–851.
- BENEA, V., VANDENBERGHE, D., TIMAR, A., VAN DEN HEUTE, P., COSMA, C., GLIGOR, M. & FLORESCU, C. (2007): Luminescence dating of Neolithic ceramics from Lumea Noua, Romania. *Geochronometria* 28: 9–16.
- BOETTER-JENSEN, L., MCKEEVER, S. W. S. & WINTLE, A. G. (2003): Optically stimulated luminescence dosimetry. Elsevier Science, Amsterdam.
- FEATHERS, J. K. & RHODES, D. (1998): Luminescence dating of Protohistoric pottery from the Great Basin. *Geoarchaeology* 13/3: 287–308.
- FLEMING, S. J. & STONEHAM, D. (1973): Thermoluminescent authenticity study and dating of Renaissance terracottas. *Archaeometry* 15/2: 239–247.
- HORVÁTH, T., SIPOS, GY., TÓTH, M. & MAY, Z. (2010): The date of the Late Copper Age ritual mask from Balatonőszöd-Temetői-dűlő. *Antaeus* 31-32: 499–512.
- JENKINS, R. (1999): X-Ray fluorescence spectrometry. Second Edition. Wiley-Interscience, New York.
- MURRAY, A. S. & WINTLE, A. G. (2000): Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements* 32: 57–73.
- PRESCOTT, J. R. & HUTTON, J. T. (1994): Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations. *Radiation Measurements* 23: 497–500.
- SIPOS, GY., & PAPP, SZ. (2009): Terrakotta műalkotások eredetiségvizsgálata és kormeghatározása termolumineszcens módszerrel, Szépművészeti Múzeum, Budapest. *Archeometriai Műhely* VI/1: 61–74.
- SIPOS, GY., KISS, T., PÁLL, D. G., TÓTH, O., SCHUBERT, G. & TÓTH, M. (2010): Mintagyűjtés, minta-előkészítés, mintaveszteség TL kormeghatározás során. *Archeometriai Műhely* VII/2: 131–136.
- TAYLOR, S. R. & MCLENNAN, S. M. (1985): The Continental crust: its composition and evolution. Blackwell Scientific Publications Ltd, Oxford.
- TÓTH, M. (2006): Eredeti vagy hamis? Archeometriai vizsgálatok a battonyai leletegyüttes néhány tárgyán. In: Kalypsó. Külföldi eredetű, a magyar határon lefoglalt ókori műtárgyak, Adatbázis. http://www2.szepmuveszeti.hu/kalypso_pdf/Eredeti_vagy_hamis.pdf
- ZIMMERMAN, D. W. (1971): Thermoluminescence dating using fine grains from pottery. *Archaeometry* 13: 29–52.
- ZINK, A. & PORTO, E. (2005): Luminescence dating of the Tanagra terracottas of the Louvre Collections. *Geochronometria* 24: 21–26.